

«Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-87-66, факс (499) 324-21-11
<http://www.mephi.ru>

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ



ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ»

на диссертационную работу Фадеева Алексея Владимировича «Исследование
латеральной однородности плазмы в реакторах микроэлектроники методами
двухракурсной эмиссионной томографии», представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 — «твёрдотельная
электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на
квантовых эффектах»

Диссертационная работа Фадеева А.В. посвящена созданию и экспериментальной
проверке алгоритма двухракурсной эмиссионной томографии плазмы, совместимого с
плазмохимическими реакторами с удаленным источниками плотной плазмы, которые
применяются в микроэлектронных технологиях.

Выбор направления исследования связан с непрерывно растущими требованиями к
однородности низкотемпературной плазмы по сечению реактора, используемой при
создании интегральных схем высокой степени интеграции. Качество получаемых структур
напрямую зависит от латеральной однородности компонентов плазмы в непосредственной
близости от поверхности обрабатываемых пластин, т.к. концентрация ионов и активных
радикалов в плазме определяет скорость протекания поверхностных реакций травления и
осаждения. Основным интерес представляет исследования латеральной однородности
незаряженных частиц, поскольку в настоящее время отсутствуют методы совместимые с
промышленными реакторами для исследования их латерального распределения. Для
оптических портов с малой апертурой, характерных для такого типа плазменных

реакторов, томографическая реконструкция спектрально разрешенного излучения компонентов плазмы является перспективным методом диагностики пространственного распределения незаряженных радикалов плазмы. Это свидетельствует о большой **актуальности темы** диссертационной работы А.В. Фадеева, посвященной развитию новых томографических методов диагностики пространственного распределения компонентов плазмы.

Диссертационная работа А.В. Фадеева состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 172 страницах, включающих 63 рисунка. Библиография насчитывает 107 наименований, включая 13 публикаций автора по теме диссертации.

В первой главе на основе обширного обзора публикаций автор анализирует классические модели компьютерной томографии, а также обсуждает современное состояние исследований в области малоракурсной томографии и указывает основные проблемы, возникающие при реконструкции в условиях недостатка ракурсов сканирования и шумов в исходных данных. В выводах к первой главе сформулированы основные задачи, решению которых посвящена диссертационная работа.

Во второй главе предложена модель, описывающая распределение концентрации частиц в сечении реактора в виде суммы однородного распределения частиц и суперпозиции конечного числа единичных пространственных неоднородностей, которые могут быть описаны Гауссовым профилем или в виде параболы в зависимости от их зарядового состояния. Оригинальность идеи предложенного алгоритма реконструкции состоит в том, что по исходным томографическим данным (лучевым суммам) проводится начальная реконструкция одним из классических методов. Затем из реконструированного поля интенсивности сначала выделяется однородный фон, а затем последовательно выделяются «элементарные» пики, начиная с пика максимальной амплитуды до исчерпания наперед заданного динамического диапазона. Важно отметить, что таким образом удастся последовательно удалять также артефакты реконструкции, возникающие из-за предельно малого числа ракурсов. Окончательная картина реконструкции, как следует из предложенной модели, представляется как суперпозиция выделенных пиков и фона.

В третьей главе приведены результаты оптимизации алгоритма, протестированного на множестве случайных томографических фантомов. Автором было обнаружено, что при определенном расположении пиков относительно ракурсов сканирования и соотношении их параметров возможно неверное определение значения

фона и выделение максимального из рассматриваемого фантома. Кроме того, для ряда фантомов результат реконструкции зависел от выбора метода первичной реконструкции и от момента начала проведения итераций. Проведенная автором оптимизация базового алгоритма привела к повышению точности определения фона и максимального по амплитуде пика, были оптимизированы принципы итерационных вычислений. Видно, что в результате оптимизации существенно повысилось качество томографической реконструкции.

В четвёртой главе изложены результаты верификации модернизированного алгоритма реконструктивной томографии. Данные независимого экспериментального исследования латерального распределения ионов аргона, полученные с использованием датчиков в виде плоских зондов Ленгмюра, были основой для составления линейных интегралов эмиссионного излучения, по которым проводилась томографическая реконструкция. Такая постановка вычислительного эксперимента исключала из процедуры верификации математического алгоритма томографической реконструкции неизбежные погрешности аппаратного накопления исходных томографических данных системой оптического сканирования и давала возможность оценить собственную погрешность алгоритма реконструкции.

В результате верификации было показано, что данный алгоритм дает качественно верное двумерное пространственное распределение ионов аргона по сечению реактора во всех исследуемых случаях. Количественное несоответствие между результатами, полученными с помощью алгоритма эмиссионной томографии, и прямыми экспериментальными измерениями зондовым методом не превосходит 6%.

В конце работы приведены результаты томографического исследования латерального распределения химически активных незаряженных радикалов F^* и ионов B^+ в технологической плазме газа BF_3 в камере экспериментального плазменно-иммерсионного имплантера с удаленным планарным индуктивным ВЧ источником плазмы. Для создания в ней явных плазменных неоднородностей (с целью изучения возможностей томографического метода исследований) модифицировались конструкция камеры, а также варьировались условия разряда. Результаты реконструкции качественно отражают физически ожидаемый вид латерального распределения концентрации частиц плазмы.

В заключении представлены результаты, обладающие научной новизной, и выводы диссертационной работы.

В приложении приведены коды программы томографической реконструкции на языке C++, отражающие основные элементы предлагаемого алгоритма.

Следующие результаты обладают несомненными признаками **новизны**:

- создание комбинированного алгоритма реконструкции латерального распределения компонентов плазмы по томографическим данным ее эмиссионного излучения в двухракурсной веерной схеме сканирования, в основе которого лежит предложенная модель поля плазменных неоднородностей, сформированных вне зоны основного плазмообразования реактора. Идея модели состоит в том, что распределение частиц в низкотемпературной плазме представляется в виде конечного числа «элементарных» пространственных неоднородностей плотности частиц (одиночных пиков), надстроенных над однородным концентрационным полем. Разработанный алгоритм был исследован и оптимизирован на случайных генерированных томографических фантомах и верифицирован в численном эксперименте на плазме аргона.
- впервые экспериментально с помощью двухракурсной эмиссионной томографии исследовано двумерное распределение ионов B^+ и нейтральных радикалов F^* в плазме BF_3 .

Достоверность результатов работы обеспечена использованием общепризнанных физических представлений, апробированных математических методов решения томографических задач, известных численных методов, а также верификацией разработанного алгоритма на тестовых экспериментах с источниками света и вычислительном эксперименте на плазме аргона. Результаты томографического исследования двумерного распределения ионов B^+ и нейтральных радикалов F^* в BF_3 плазме технологического реактора являются физически непротиворечивыми. Результаты обсуждались на международных научных конференциях в среде компетентных специалистов и публиковались в рецензируемых научных журналах.

Практическая и научная значимость проведенного исследования заключается в том, что предложенный и исследованный экспериментально метод эмиссионной двухракурсной томографии плазмы может быть использован при конструировании новых типов технологических реакторов и разработке новых технологических плазменных процессов для микро- и нанoeлектроники.

Работа выполнена на высоком научном уровне. Результаты диссертационной работы полностью представлены в 13 публикациях, включая 4 статьи в рецензируемых журналах, и апробированы на 4-х международных конференциях ICMNE (2003, 2007, 2009) и 16th International Vacuum Congress (2004). Содержание диссертации соответствует

специальности 05.27.01 – «твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

К диссертационной работе А.В. Фадеева можно сделать следующие **замечания**:

- нечетко прописан алгоритм разделения плазмы на фон и единичные неоднородности плотности, что в условиях не модельной, а реальной плазмы, когда число подобных неоднородностей заранее неизвестно, может привести к неоднозначности восстановления распределения,
- не проведены оценки того, как будет расти расчетное время решения томографической задачи в зависимости от числа элементарных неоднородностей,
- нет четкой формулировки ограничений предложенного алгоритма, а также при каких условиях в камере плазменного технологического реактора алгоритм наиболее эффективен.

Высказанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работ.

Диссертация Фадеева А.В. «Исследование латеральной однородности плазмы в реакторах микроэлектроники методами двухракурсной эмиссионной томографии» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу по современной и актуальной тематике.

Материалы диссертации могут быть использованы в организациях, занимающихся исследованиями в области наноэлектроники, нанотехнологии и прецизионной измерительной техники, таких, как Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Институт физики твердого тела РАН, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Институт физики микроструктур РАН, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, НИИ Точного машиностроения (Зеленоград), Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Институт оптики и спектроскопии РАН, Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, Московский институт электронной техники (технический университет), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» и других научных центрах, занимающихся исследованиями и разработками по данной проблематике.

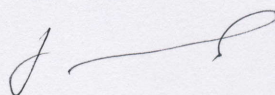
Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации. Основные материалы опубликованы в ведущих научных журналах из списка, рекомендованного ВАК, и докладывались на международных и российских научных конференциях.

Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что по объему полученных результатов, достоверности, научной и практической значимости выводов она удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор – Фадеев Алексей Владимирович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01-«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Материалы диссертации доложены автором на совместном заседании НТС кафедры физики плазмы и кафедры микро- и нанoeлектроники НИЯУ МИФИ 11 сентября 2014 года. Отзыв составил н.с., к.ф.м.н. Урусов В.А.

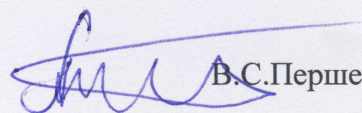
Отзыв утвержден на заседании Совета ф-та ЭТФ 27 октября 2014г, протокол № 4

Заведующий кафедрой физики плазмы
НИЯУ МИФИ, д.ф.м.н., профессор



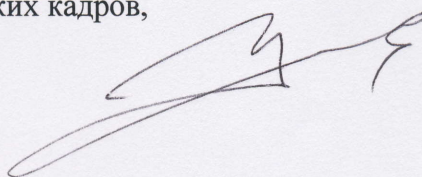
В.А.Курнаев

Заведующий кафедрой микро и нанoeлектроники
НИЯУ МИФИ, д.т.н., профессор



В.С.Першенков

Председатель Совета по аттестации
и подготовке научно-педагогических кадров,
д.ф.м.н., профессор



Н.А.Кудряшов

Адрес: 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.
vik@plasma.mephi.ru
т. 8(926) 5643180